

橋梁デザイン教育において構造、デザイン、歴史を統合することに関する一考察¹⁾

A Study on Introduction of Civil-Engineering History to
Initial Bridge Design Education in University

鈴木圭^{*1}

By Kei SUZUKI

概要

本論分は、大学での橋梁デザイン初期教育において、土木史をどのように取り入れるかについて述べるものである。橋梁デザインの初期教育の目的は、構造デザインとコンセプチャルデザインの両者を同時に理解させ、橋梁デザインについて興味や関心を持たせることによって、自発的にエンジニア、デザイナーの作品や考え方について研究しようとする姿勢を育てるものであると考える。そのためには、これまでの歴史的構造物のデザインの変遷とともに構造力学の基本を理解させることが重要であり、適切な教材の作り方、教え方について実践を経験した立場から提案し、ホームページ等によって議論する環境を提案するものである。

1. はじめに

2004年に景観法が成立し、良好な景観は現在及び将来の国民の共通の資産である認識が示された。こうした中で良好な景観をつくることを仕事にしたいとデザインやまちづくりに興味をもつ学生が増えたことは好ましい状況である。一方、土木という名称が使われなくなり都市環境学科、建築都市デザイン学科、建設学科という名称に変更する大学が増えている。これは土木というエンジニアリングのスペシャリストというイメージから、環境、景観、まちづくり、防災等を扱う総合的なエンジニアの育成にシフトしてきたものと考えられる。先ず、問題提起として、以下の3点を挙げる。

第一に、都市環境学科の1年生に対して毎年意識調査を実施しているが、土木を志望してきた学生の割合は、ほぼ全体の3分の1であり、建築を志望したがやむなく土木の学科に入学した学生が3分の1、どちらともいえないという学生が3分の1という状況であり、土木工学に関する関心は高いとはいえない。また、簡単な力の釣合いに関する計算問題を出しても次元を確認せずに解答する学生が多い。この問題は立花隆によれば日本の中等教育における理科の内容の切下げに起因するとしている¹⁾。

第二に、教える側から観ると、大学初期教育期間（ここでは1年、2年を対象とする）のカリキュラムの中で土木史を独立して教えるゆとりもなく、土木史という時間的に広がり

のある対象の中から、何をどのように教えたらいいかという迷いも一方にあると思われる。

第三に、日本の大学で使われる構造力学、鋼構造学、コンクリート工学の教科書、参考書を見ると、原理、法則の考案者について5W1Hが示されていないという共通の傾向が見える。初めにある原理、公式を示し、次にその式がどのように導入できるかを示し、最後に基本・応用問題が出されるというパターンである。与えられた問題に対して、構造解析をする能力を身につける方法ではあるが、学生が自ら興味を持って、何故その理論が発明されたのかについて研究しようとする気持ちや、自ら新しい構造、理論を考えようとする気持ちは起こりにくいといえる。科学と技術の歴史を観ると、はじめに石造アーチ、木製トラスなどの構造があり、次に構造が何故成立するのかを物理的に明らかにするために解析理論が生まれるというのが基本的なパターンである。表1に代表的な構造理論とそれに係った人物、橋梁構造を考案した人物を挙げる。

これらの第1の原因は、材料学、構造及びデザインの歴史に関する情報が不足していること、第2に、そのような情報を扱った資料や文献が少ないことに起因すると考える。

そこで、著者は土木工学を積極的に学ぼうとする動機を与え、自己学習能力を身に着けることが大学初期教育の目的と考え、対象を橋梁デザインに絞って、限られた時間の中で橋梁デザインと構造力学の基本を同時に理解させるために、歴史を導入する方法について述べる。また、橋梁デザインの実務者はデザインの過程で必ずといってよいほど現在までのデザインの歴史を振り返る。歴史の中に新しい構造やデザインの手掛かりを見つけるためという場合もあれば、自分の考

* keywords: 土木史、橋梁デザイン、デザイン教育

** 正会員 鈴木 圭

(〒134-0081 江戸川区北葛西 4-10-3)

えたアイデアのオリジナルティーを確認するためという場合もある。このような実務者がどんな場合に歴史は面白いと思うのか、その感動の一端をホームページ等によって紹介し、自由に議論ができる環境整備を提案するものである。

表ー1 理論・構造と発明者の関係 (鈴木 圭)

大分類	小分類	人物
静力学	てこの原理 力の釣合い 力の三原則	アルキメデス(BC267-212)) ダ・ヴィンチ(1452-1519) ニュートン(1642-1727))
	片持ち梁 応力と歪 ヤング係数	G.ガリレオ(1564-1642) R.フック(1635-1703) T.ヤング(1773-1829)
弾性論	たわみ曲線	J.ベルヌイ(1664-1705)
	座屈	L.オイラー(1707-1783)
	ひずみ エネルギー	B.P.E.クラペーロン(1746-1818) カスティリアーノ(1847-1884)
	微分方程式	G.W.ライプニッツ(1646-1716) C.L.M.H.ナビエ(1785-1836)
トラス	建設	A.パラディオ(1508-1580) H.グルーベンマン(1668-1736)
	図式静力学	K.クールマン(1821-1861) H.M.ブレスロー(1851-1925)
吊橋	建設	J.フィンレー(1762-1828) テルフォード(1757-1834) ローブリング(1806-1869)
	理論	ナビエ
鉄筋コン クリート	建設	J.モニエ(1823-1906) エヌビク
	理論	M.ケーネン(1849-1924) R.ヴィルヘルム(187-1906) E.メルシュ(1872-1950)

2. 構造・デザイン・歴史を統合した文献の海外との比較

はじめに海外において、構造とデザインを統合させた文献を概観する。石橋、鋼橋の橋梁美について体系的に触れたのは「橋梁建設」(1904年)の第三章において「橋梁の芸術的フォルム」を著したR.バウマイスター(独)である。当時、カールスルーエ工科大学においては「芸術的フォルを扱う講座」(Kunstformenlehre)が存在し、橋梁の景観(aethetik)に関する授業が行われていた。その後、1913年にエンペルガー(奥)が「新しいアーチ橋」(1913年)において、スレンダーなコンクリートアーチ橋を実現するために、鋳鉄アーチをコンクリートで巻きたてる工法に関する実験を行い、シュバルツェンベルク橋(Schwarzenber)に適用したことを鋳鉄橋の歴史とともに紹介した。1928年に第2回国際橋梁会議がウィーンで開催され、ハルトマン(奥)の「橋梁の景観」(1928年)を題材として橋梁美について議論されたが、この会議がドイツ語圏において景観論を展開する切掛けとなったと考える。1933年にヒトラー政権の成立とともにアウトバーン建設局が創設され、トット(F. Todt)総監の「風景に融合する道路の建設」(Landschafts-gebundene-bauens)のコンセプトのもとに、シェヒテル(Schaechterl)、レオンハルト

(Leonhardt)、ルックウィード(Rukwied)等の橋梁エンジニアが建築家、造園家と協働してアウトバーンの橋梁を建設した。彼らは実務と並行して橋梁景観論を展開し、視覚的な事例とともに橋梁美の言語化・法則化を試みた。レオンハルトの「橋」(1984年)はプレストレストコンクリート技術を適用した桁橋、斜張橋を加えて橋梁景観論を集大成したものである。風景と構造の統一という概念は、「空間、時間、建築」(1941年)を著したギーディオン(スイス)にも影響を与え、「建築と人間環境の調和」をテーマとして、この名著が執筆された。特に、マイヤールの橋梁を構造と美が融合した新しい作品であると評価したことにより、ビル(M. Bill)(スイス)が「ロベール・マイヤール」(1969年)においてコンクリート橋の橋梁美を紹介し、ビルントン(米)(D. P. Billinton)が「塔と橋」(1983年)によって構造芸術(Structural Art)を提唱するに至ったと考える。

歴史と建設技術を組合せたものはシュトラウプ(スイス)による「建設技術史」(1949年)で古代ローマの構造物から1950年代のネルヴィの建築に至るまでの建設技術が力学、材料力学の発展にどのように影響したかを述べている。構造解析技術と歴史を組合せたものはチモンシェンコが書した「材料力学史」(1969年)であり、同年のうちに日本語版が出版されている。特に、この分野を集大成したものがキューラー(独)による「構造理論の歴史」(2008年)であり、2005年のマドリードにおける「構造の歴史に関する国際会議」がきっかけとなり、ガリレオ、ニュートン、オイラーをはじめとする解析家の思想を原典から直接引用するとともに、構造解析理論は実構造を建設するために発想されたことが示されている。

次にドイツにおける工学教育が1990年代から大きく変わってきた点について一端を紹介する。

3. 構造とデザインを統合する動き

橋梁デザインのプロセスでは、その場のコンテキストを読み、何を主張しどのような構造を実現するのかを考えることから始まる。そして物まねではなく、これまでに無い新しい構造とデザインを同時に考える。その場合、エンジニアとアーキテクトという職能が別々の場合は、どちらが主導権を取ってもよいし、また、エンジニア・アーキテクトという職能として一人が担当してもよい。1990年代イギリスのドックランドにおける橋梁コンペでは、アーキテクトとエンジニアのどちらが主導権を握った方が、優れた構造物ができるのかという議論が浮いた。結果は、どちらの場合でもコミュニケーションが十分にとれているチームが優勝する傾向があるとのことであつた。こうした現状に対応できるエンジニアをどのように育成するかが、大学教育の課題と考え、ドイツの大学の取組について紹介する。

1990年代の初めにシュツットガルト工科大学のシュライヒ教授(Joerg Schlaich)と、シェーファー教授(Kurt Schaefer)が「構造物のコンセプト・アルデザイン」と題したワークショップを導入し、1996年には、クールマン教授(Ulrike Kuhlmann)とともに、“コンクリート構造”や“鉄骨構造”という名称を廃止して、“設

計・建設科」という名称に変更し、“建設材料を総合的に把握する講座”(Werstoffuebergreifend Lehre)を開いた。現在もこの考えはヴェルナー・ゾーベック教授(Werner Sobec)やクールマン教授に引き継がれさらに発展している。

ベルリン工科大学においては、2004年にマイク・シュライヒ教授(Mike Schlaich)が土木工学 設計・建設科(Entwerfen und Konstruieren Massivbau)の教授に就任し、これまでの材料別に教室が分かれていたことに対して、建設材料を総合的に把握するという考えに基づいて、教室を統合化する方向を示し、コンセプチャルデザインと構造デザインを大学1年生から教えるという教育スタイルを実施している。

さらに2005年に出版されたfib公報32号の「歩道橋デザインのガイドライン」には、コンセプチャルデザイン(Conceptual Design)とは、周辺環境に適合する新しいデザイン(形、構造フォルム、システム)を提案することを意識し、環境と全体構造系との関係を考えることであると定義した。これらは実際にデザインする状況に対応する教育法であり、教育と実践とが大学教育において融合した形であると考えられる。

4. 構造、デザイン、歴史を統合する試み

橋梁デザインにおいて、何故歴史が必要なのか？ 実務的な観点からは、自分の考えたアイデアの独創性を検証・評価するためである。自己学習の観点からは、知的な刺激に満ちており、技術を通じて人類の知恵を体感する場であるからである。大学の初期において、歴史を取り入れる場合は、通史として紀元前から扱うのではなく、特定の年代の橋梁をテーマにして、何故その橋梁の建設がその時代に可能であったかを考えさせ、一方では、簡単な模型を使ってその構造が成立することを体感させ、次ぎにその構造を静定構造物と仮定して、簡単な計算例を示すことが適当であると考えられる。このような事例を、実際に学生に対して講義されているエンジニアやアーキテクトの方々に事例を紹介して頂き、それを土木学会のホームページで公開してはいかがであろうか。

以下にローマの水道橋とアヴィニョンの石橋を例にとつて、学生に橋梁の歴史と構造理論に興味を持って頂く方法を解説する。

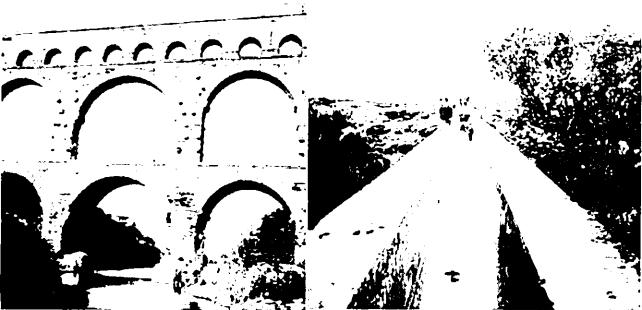


写真-1 ガール水道橋全景 写真-2 頂部の水路
(撮影：鈴木 圭、1989)

約2000年前のBC15年に建設されたローマの Pont de Gard 水道橋(写真-1)を例にとつて、アーチを構成する1個の石は約6トンであり、それを持ち上げるにはどんな機械や支保

工を使ったのか？ 水を流すための水路勾配として0.03%を確保したが、その精度はどのような測量器具や材料を使って可能であったのか？(写真-2)と質問する。様々な意見が出た後に、滑車を使っていたこと、木をくり貫いて水を張った水準器でレベルを出し(図-1)、水路にはセメントを使って勾配を確保したこと、アーチの構築には木製のトラス架構が使われたこと(図-2)を示す。2000年前に現在のクレーン、水準器、支保工の起源となる技術がすでに存在したことを、知ったら学生はどのような反応を示すだろうか。

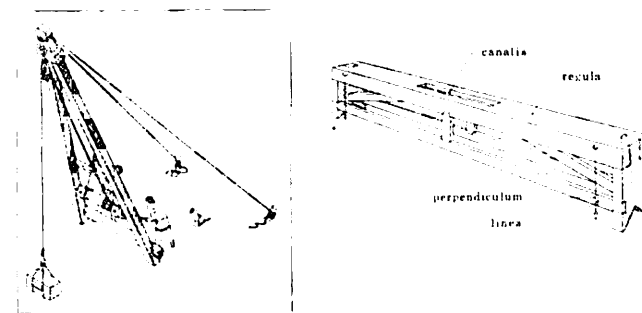


図-1 揚重機として滑車を使った事例(左) 水準器として水は張った木製梁(右)を使った事例²⁾

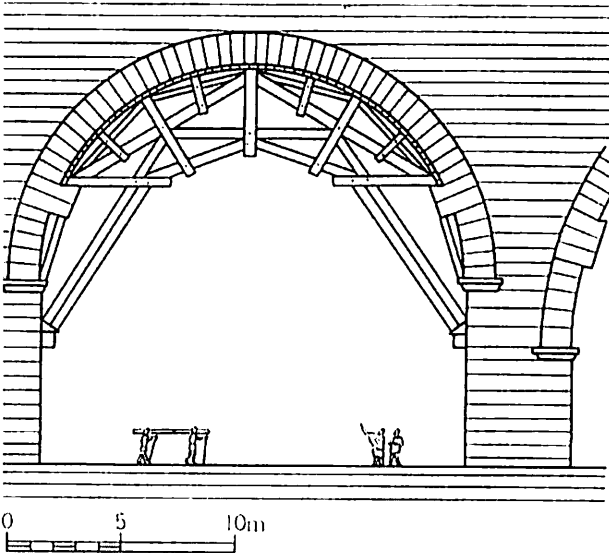


図-2 アーチの建設に木製支保工を使った事例³⁾

次にアーチに作用する水平力は、どの程度掛かるのか？また、それをどのように計算で求めるのか？という点について、模型を使って体感させ、その解法を考えさせたいかがであろうか。アーチの形は、時代が進むにつれてローマ時代の半円から扁平に変化する。1185年に完成したアヴィニョンの石橋はアーチのライズが約半分になる(写真-3)。この場合、



写真-3 アヴィニョンの橋(撮影：鈴木 圭、1989)

アーチスパン、荷重が同じ条件でライズが半分になった時、水平力はどの程度になるか？ このような問題を与えモデルを作って体感する方法として、著者は写真-4に示すアーチ（スパン30 cm）、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートのモデルを考案した。これを実際に学生に組み立てさせるが、最初は3人に依頼し、次は2人で作りなさいという課題を与える。その場合、支保工として、ボール紙を曲げたものを使うと2人でアーチの模型を完成させることができる。

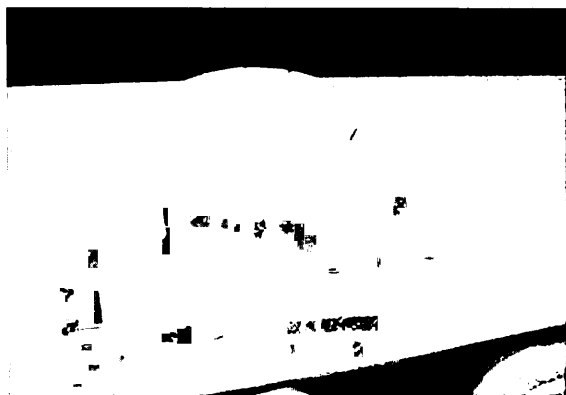
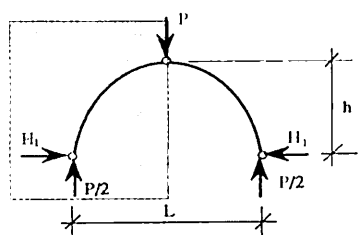


写真-4 アーチ、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートの模型（撮影：鈴木 圭、2008）

次に実際に、アーチを支えるために必要な水平力を求める方法を、静定構造として3ヒンジアーチと仮定すると簡単に計算することができる（図-3）。



携帯 110 g をアーチの天端に載せた時、アーチにかかる水平力 H_1 は？
 $H_1 \cdot h - P/2 \cdot L/2 = 0$
 $H_1 = P \cdot L/4h$
 $H_1 = 110 \cdot 30/4 \cdot 15$
 $= 55 \text{ g}$

図-3 アーチの水平力を求めるモデル

さらに、高さを半分にした場合の水平力がどうなるかについては、上記の h を $1/2$ とすれば、水平力が2倍の結果となることが導ける。

鉄筋コンクリートの模型の場合も同様で、実際に学生に作らせた状況を写真-5（左）に示す。もし鉄筋の配置を誤って、配筋した場合にどうなるかを示したものが写真-5（身右）である。

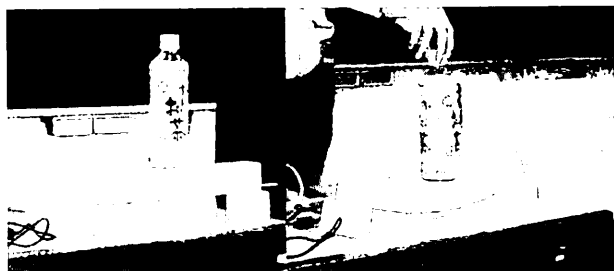


写真-5 正しい配筋（左）と誤った配筋（右）（撮影：鈴木 圭、2008）

鉄筋コンクリートも力の釣り合いから、鉄筋に作用する引

張力を簡単に求めることができる（図-4）。

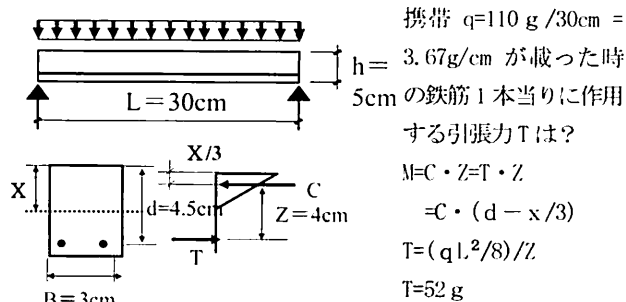


図-4 鉄筋コンクリートの解析モデル

このようにして、何故構造が成り立つかを、模型を使って体感させ、実際にそれを理論的に解析しようとしたのが力学の歴史であると講義を進める。具体的にG. ガリレイ（1564～1642）が鉛直に固定した石柱の先端に錘をつけた時にどのような力が作用するかを考え、片持梁で力の分布を考えたのは1600年代であった（図-5）。さらに興味をもった学生のために適切な図書を紹介すると、自己学習の手掛かりとなる。

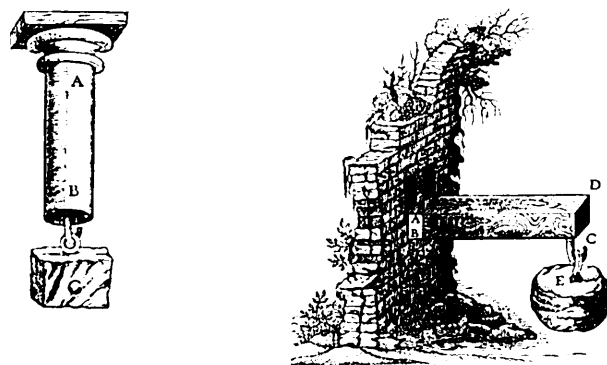


図-5 ガリレイの引張り、曲げを受ける梁の実験図⁴⁾

今回の事例は、アーチと梁に関する実験と簡易な理論であるが、吊橋やプレストレストコンクリートについても、簡単に実験と計算式を導くことができる。また、1コマ90分の時間の中で、アーチ、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、吊橋の基本構造を理解させることができる。

5. あとがき

このように構造やデザインに興味を抱かせるテーマを考案し、それを土木学会のホームページで紹介することによって、短い時間の中で構造、デザインに興味を持つ学生が増えてくるといった効果が得られるのではないかと考える。また、実務者から幅広くアイデアを出して頂く環境を整備することが、今後の土木史研究会の発展に繋がるものと考えている。

参考文献

- 1) 立花隆：東大生はバカになったか、pp10、文春文庫、2004年
- 2) J.P. Adam: La Construction Romaine, pp18,46, G. M. Pichard 2005
- 3) J.P. Adam: La Construction Romaine, pp191, G. M. Pichard 2005
- 4) K.E.Kurrer: Geschichite der Baustatik, pp169, Ernst & Sohn 2003